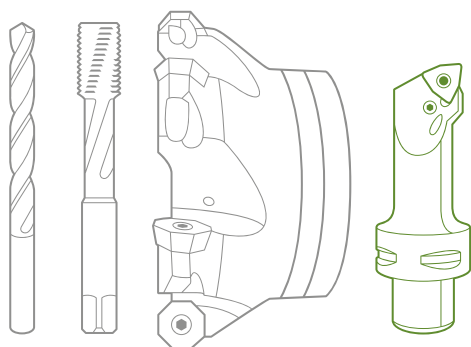


金属切削 – 能源转型的推动者？

Whitepaper



图片来源：Adobe Stock



据国际能源署 (IEA) 预测, 到2027年, 全球能源需求年均增长率将接近4%。其中, 中国的电力消耗年上升率甚至将达到约6%。据IEA称, 新增需求的85%来自新兴经济体和发展中国家。*

* 来源：www.manager-magazin.de

全球对能源的需求正在迅速上升。这使能源行业面临其历史上较大的挑战之一。主要因素包括日益普及的电动汽车、热泵、电池生产、用于制氢的电解技术—当然还有人工智能！因为随着人工智能数据中心的迅猛增长，其能源需求也在显著增加。此外，全球人口的增长—尤其是新兴市场和发展中国家—及其能源需求也在不断增加。受此影响，该行业正经历一场深刻的转型：可再生能源正得到大规模扩建。与此同时，化石能源设施也在技术上不断升级和现代化改造。最后但同样重要的是，正在规划建设新的核电站，这些核电站将依靠被动系统和创新冷却剂来提高安全性。通过采取此类措施，该行业正在推动效率、供应安全性和竞争力的提升。与此同时，投资规模达到历史最高水平，成本不断上升，时间压力日益增大，供应链的不确定性也在不断加剧。

然而，能源项目能否真正实现其经济效益目标，并非取决于规划阶段。真正的考验在于实施阶段！在那里，CAD渲染图将转化为重达数吨的精密部件；在那里，设备运行时间、部件参数和工期窗口不留任何出错的余地。

汽轮机缸体和叶片、压缩机、转子、齿轮箱和轴承等部件是现代能源设施的支柱。其质量直接决定了设备效率、运行可靠性、使用寿命以及供电安全性。此外，它们也是整个价值链中成本最高的环节之一。

因为此类零部件的加工过程复杂、风险高且成本昂贵。高合金钢、难切削的高温合金以及大尺寸工件对机床、刀具和流程提出了严峻挑战。每次刀具崩刃、每次返工以及每次停机都会对成本和工期产生负面影响。



透平叶片需承受极高的热应力和物理应力。只有高温合金才能满足这一要求，但这类材料同时又难以切削加工。

图片来源：Adobe Stock。

现代切削技术是成功的关键因素

以汽轮机为例：用于燃气、蒸汽和核电站的汽轮机叶片及缸体对材料要求极高，且需要经过复杂的制造工序涵盖大平面铣削、连接界面精密加工等多道工序。此外，部分加工工序需在后续制造阶段才进行—若加工过程不稳定，极易造成巨大的经济损失。

风能领域的大型零部件所面临的形势同样严峻：现代海上风力发电机的转子轴和轴承部件尺寸极大*，必须满足对尺寸精度、表面质量和重复定位精度特别高的要求。

* 因此，迄今为止制造的全球最大的风力发电机叶片长度约为130米，重达60吨。（来源—截至2023年：<https://www.cpmx.com/de/rotorwiki>）

先进解决方案能带来可量化的竞争优势

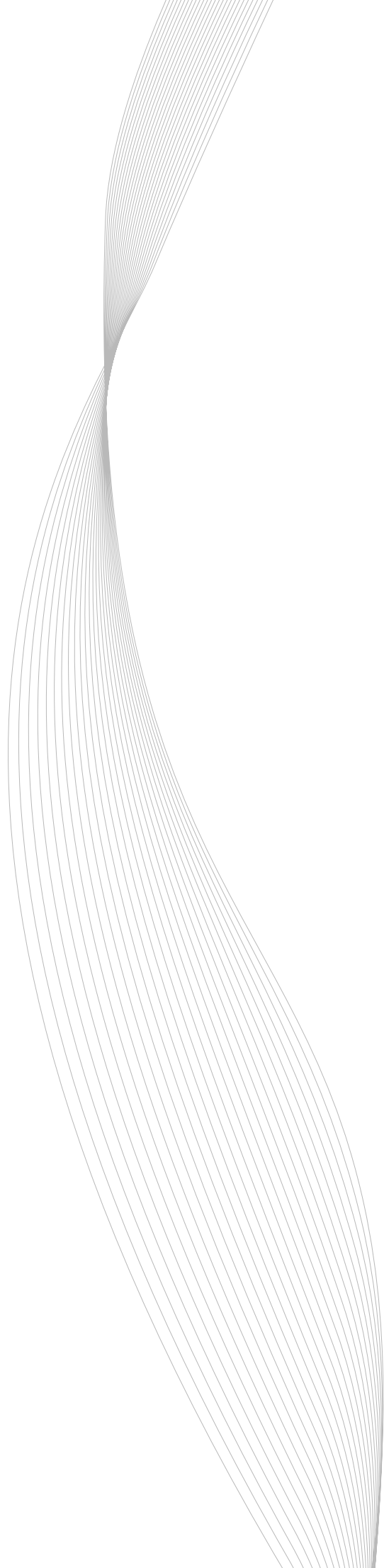
高性能刀具和优化的切削策略可缩短加工时间，并加快项目进度。返工和废品率被降至最低。效率得到提升。生产过程中的能源和资源消耗得以降低。总体而言，先进的生产解决方案不仅能加速制造流程、将风险降至最低、确保规划的可靠性，还能持续提升效率。这使得切削加工远不止是生产流程中的又一个操作环节，它对总体拥有成本**、产品上市周期***以及投资安全性都产生了重大影响。

** 总拥有成本

*** 产品上市周期

简而言之：战略性地运用现代切削技术，不仅能优化生产流程和提升零部件质量，还能降低成本，并为可靠且具有未来前景的能源供应奠定工业基础。

本白皮书阐述了现代刀具产品和加工策略如何使能源设备工件的生产更加快速、经济且可靠。



金属切削— 能源转型的推动者？

第一章

不仅方案至关重要，实施同样重要

第一章

材料、工件及切削加工的持续应力试验

第一章

现代刀具和工艺流程如何创造经济效益

第一章

总结与展望



图片：Adobe Stock

第三章：

不仅方案至关重要， 实施同样重要

示例：发电机轴



要加工长度达16米、直径大于1米的发电机轴，需要专用机床和专用刀具。

图片：Walter (瓦尔特) AG

能源项目几乎总是从数字设计图开始。设计CAD模型、对设备进行仿真、优化效率、计算载荷工况并预测使用寿命。数字孪生和虚拟调试实现了前所未有的规划深度。然而，尽管这些数字工具功能强大，但项目的成败并非取决于屏幕上的表现，而是取决于工业现实中的表现——即经济性、工期遵守情况和设备库存状态。

任何在技术上令人信服的方案，其价值都取决于其可实施性

在实际生产中，这意味着：工件不仅要能正常工作，还必须能够经济高效地制造出来。然而，工件越复杂、质量越高，制造过程中的偏差所造成的后果就越严重。

这一点在单件价值高且几何形状复杂的零部件上表现得尤为明显。转子、压缩机、轴承和传动部件、汽轮机缸体和叶片，甚至是发电机轴，都涉及巨大的材料、机床及制造成本。在此背景下，技术实施便成为战略杠杆。高效的制造工艺以及对相关切削技术的掌握，是实现可靠规划、规避风险——从而保障投资安全的核心前提条件。

现代切削技术在此发挥着关键作用。因为它们决定了能否以工艺可靠且经济高效的方式制造高要求材料和复杂几何形状。视角正在发生转变：即便是最优秀的方案，也只有在工业条件下能够可靠、高效且可扩展地实施，才能真正取得成功。

发电机轴是现代能源设备中最宏伟、制造工艺要求最高的部件之一；目前，一个200吨的毛坯价格高达500,000欧元，因此它们也属于成本最高的部件之一。它们通常由以下部分组成：韧性强且相应难以加工的镍-铬-钼钢（26NiCrMo14-5）。在发电厂的大型汽轮发电机中，其长度可达15米左右，直径则达到1米及以上。尽管如此，它们在运行时仍需以每分钟3 000至3 600转的速度旋转，以达到50赫兹和60赫兹的额定频率。这些尺寸数据清楚地表明，制造这些昂贵的巨型部件不仅需要付出非凡的努力，还伴随着极高的经济风险。

技术上最具挑战性的步骤之一是铣削纵向槽，后来励磁绕组的铜线将嵌入其中——也就是那些导电体，电流通过它们，从而产生发电机的磁场。这些开槽必须具有精确成型的横截面。只有这样，才能将铜导体精准地安装、固定并进行完善的绝缘处理。若开槽的宽度、切削深度或平行度存在公差偏差，不仅会增加绕组难度、危及电气绝缘，还可能在运行中引发严重的热问题。

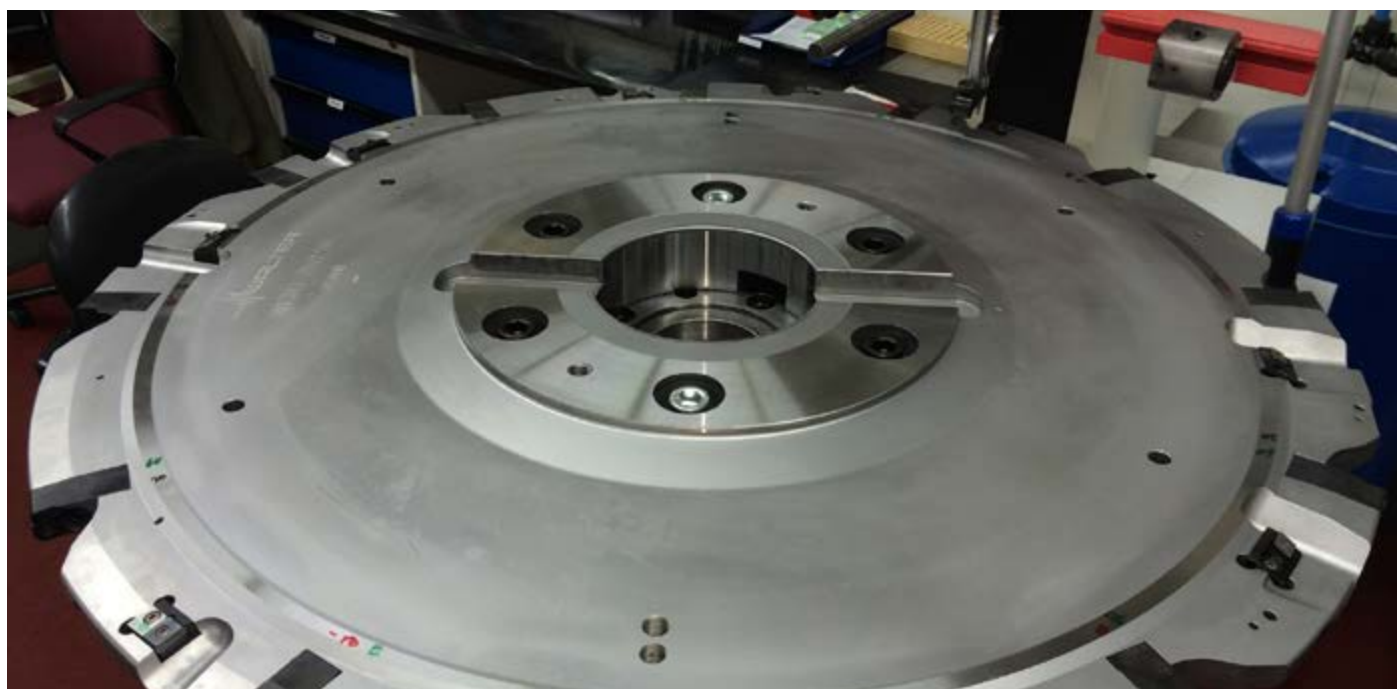
表面质量是质量标准

加工开槽时，决定性的质量标准是其表面质量：槽壁和槽底必须达到规定的粗糙度，因为它们会与绝缘材料或铜导体直接接触。粗糙或不平整的表面可能会损坏绝缘层，降低热传导效率，甚至导致爬电电流——这对发电机的使用寿命及其运行安全性都会造成严重后果。

为了对绕组槽的锥型侧壁进行精加工，会使用装有专为此设计的Wiper 修光刃可转位刀片的精加工铣刀。这些刀片专为满足槽轮廓的特殊要求而设计，必须具备极高的锋利度，才能在精加工过程中达到要求的表面质量。对切削刀片切削刃质量、精度和涂层的要求同样极高。要求之高，以至于全球仅有少数几家刀具制造商（包括Walter（瓦尔特））能够可靠地满足这些质量要求。

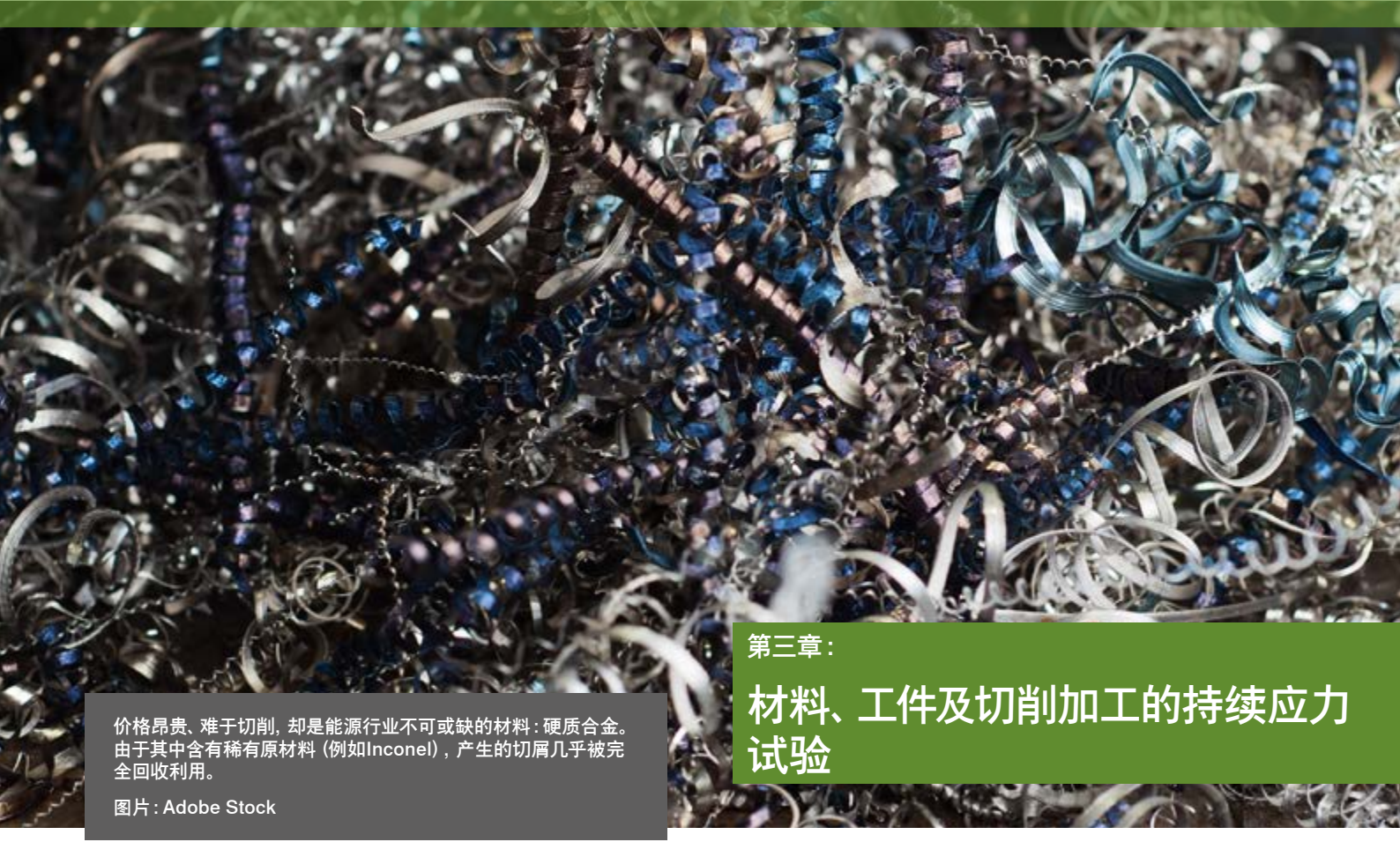
工件尺寸进一步加剧了这一挑战。因为在高强度钢上铣削长达数米的开槽过程，不仅需要确保刀具引导过程的可靠性，还要求夹持状态极其稳定，并坚持不懈地对热量产生和刀具磨损进行控制。

发电机轴（例如核电站中的）毛坯重量轻松可达220吨。这在材料、搬运和加工时间方面都是一个真正的成本因素。因此，在加工过程中，工艺可靠性被置于首位。精度同样至关重要。因为振动或刀具偏移——这些在较小工件上或许尚可容忍——但在发电机轴上会导致偏差，这些偏差会沿整个槽长累积，最终导致工件报废。鉴于部件成本和加工投入，对已加工完成的发电机轴进行返工在经济上几乎不可行。因此，废品不仅意味着昂贵毛坯的损失，还意味着数周无谓的加工时间投入。



锥型精铣刀（图中为Walter WF341）用于加工发电机轴上的绕组槽。为了对槽的锥形侧壁进行精加工，需使用专门为此设计的、非常锋利且高精度的可转位刀片。

图片：Walter（瓦尔特）AG



价格昂贵、难于切削，却是能源行业不可或缺的材料：硬质合金。由于其中含有稀有原材料（例如Inconel），产生的切屑几乎被完全回收利用。

图片：Adobe Stock

第三章：

材料、工件及切削加工的持续应力试验

恒久精密，历久弥坚

能源转型对材料和工件提出了极高的要求：例如，风力发电机中的巨大机械载荷、混合氢气燃气轮发动机中的极端高温，以及传动系统所需的极高疲劳强度等。为此，需要采用切削性能可预测且组织均匀的材料，以确保由此制成的工件能够持续运行数十年。为了经济地生产这些部件，可加工性与强度的平衡至关重要。高性能材料能够提供必要的工艺可靠性，而组织结构不均匀的材料往往会导致代价高昂的折中方案。特别适合的材料包括：

④ 高强度热处理合金钢

例如 42CrMo4、34CrNiMo6 是机械动力传动的支柱，例如用于风力发电机中的实心主轴或变速箱部件。尽管这些材料具有高强度和高韧性，但仍能确保非常均匀的切削性能。通过采用合适的涂层和机床设计，可以实现高尺寸精度和表面质量的加工——这是在恒定载荷下避免切口效应的关键因素。

- ④ **钛合金**（例如 Ti6Al4V）具有极高的强度，同时具备耐腐蚀性——非常适合用于燃气轮发动机的部件，在叶片尺寸较大的情况下，也可用于蒸汽轮机。尽管其导热性较低且易发生冷作强化，但其切削加工过程却非常可控。通过采用锋利的切削刃，并针对性地实施冷却液供应，直接输送到切削作用点，即使在部件重量较轻的情况下，也能实现工艺可靠性高。

④ 高温合金（例如 Inconel 718/625）

是新一代高效发电厂和氢气燃烧装置的首选材料。镍基合金具有极高的耐热性，即使在极端热负荷条件下也能保持其强度。虽然它们被认为难以切削加工，但其均匀的晶格结构配合高压冷却技术，仍可实现复杂截面零件（如汽轮机叶片）的制造。镍基合金还包括雷内合金（例如雷内41和雷内80）。其抗热变形的稳定性使其成为制造公差极小的精密部件的首选材料：例如第一阶梯（直接邻近燃烧室）的高压叶片，或燃气轮发动机中的高温密封圈。但由于它们即使在极高的切削温度下仍能保持极高的硬度，因此需要采用特殊的切削策略！

- ④ **球墨铸铁**（例如 GJS-400 至 GJS-700）是大型风力发电机壳体和轮毂的标准型材料。然而，铸铁给精密切削加工带来了巨大挑战：虽然其中含有的石墨具有轻微的润滑作用，但其组织可能存在局部不均匀性。这会导致刀具磨损不均匀，与锻造钢相比，对比其他钢种，更难满足精细公差的要求，例如在切槽密封座或实现配合精度时。

- ④ **铸钢**（例如 GS-38、G20Mn5）常用于大体积缸体（例如在发电厂建设中），但存在产生气孔、孔隙或砂夹杂物的风险。材料中的不均匀性会导致切削刃承受突发的载荷。

工件材料组	工件	优点
淬火钢	转子轴、驱动轴	韧性、疲劳强度
钛合金	较大汽轮机叶片、泵、传感器外壳	轻便性、防腐性
因科镍，雷内	汽轮机叶片和燃气轮发动机转子盘	耐热性 > 700°C
铸铁 (GJS)	转子轮毂、齿轮箱	阻尼，复杂几何形状
铸钢 (GS)	蒸汽轮机缸体	厚实的壁厚，抗压强度

高端材料—XXL级精度



一台陆上风力发电机的转子轮毂重约30吨。因此，要以极高的尺寸精度制造它，难度相当大。

图片：Adobe Stock

选择正确的材料只是成功的一半；较大的挑战在于可扩展性。因为无论是制造紧凑型零部件，还是生产重达约30吨、用于风力发电机的转子轮毂，两者之间存在天壤之别。在如此庞大的尺寸范围内，切削加工绝不容许有丝毫差错。

两个世界在此碰撞：一方面，转子轮毂的巨大质量要求进行高切削深度、金属去除率高且性能强劲的稳定型粗加工；另一方面，轴承座、精密配合面以及对功能至关重要的连接几何形状，则需要以最高精度进行加工。圆度、同轴度、尺寸精度……极端的材料切除与高精度精加工相结合，对切削工艺提出了极高的技术要求。其中，切削刃所承受的高机械和热负荷尤为关键——这主要由较大的切入截面、较长的加工时间以及球墨铸铁的高强度材料特性所导致。

工艺过程中产生的热量不仅会对刀具磨损产生负面影响，还会（由于工件的热膨胀）影响尺寸精度。要妥善平衡工艺可靠性、精度和生产效率之间的关系，仅靠标准技术是远远不够的。

然而，该如何应对这些要求呢？

在下一章中，我们将探讨现代高端刀具和创新的涂层技术如何不仅能够克服技术障碍，还能带来可量化的经济效益——从延长刀具寿命到显著缩短生产周期。



采用现代刀具解决方案不仅能提高刀具寿命、稳定性和工艺可靠性，还能显著提升效率和经济性。

图片：Adobe Stock

第三章：

现代刀具和工艺流程如何创造经济效益

缩短非生产时间的方法

现代刀具系统的核心目标之一，是尽可能避免生产过程中的非生产时间。这其中也包括减少必要的装夹次数。在加工大型工件时，这一点对经济性影响尤为明显：因为每次对工件（例如重量达300吨及以上的蒸汽轮机轴）进行重新对准，不仅耗时，还必须极其谨慎，以避免定位误差及由此导致的尺寸偏差。

使用具有高耐用性的现代化刀具，可显著提高生产过程中的工艺可靠性高，并减少更换刀具的频率。由此，加工过程中的计划外中断将减少，生产流程的规划也将更加可靠。刀具系统的运行越可预测，生产过程的节拍就越均匀、越稳定。

特别是在处理复杂几何形状和敏感功能表面（例如轴承座或密封面）时，稳定的加工过程尤为重要。因为这有助于避免尺寸偏差、表面缺陷或边缘区域因热应变造成的损伤，防止废品产生，并减少计划外的返工。这充分说明：工艺稳定性高是确保零部件质量始终如一——以及实现经济性高的生产流程——的关键前提条件！

实践示例

通过以下精选示例，可以清楚地看到，针对特定零部件设计的刀具系统如何能够提高生产效率：

示例：发电机轴



长约15米，重达220吨：这根电轴是发电机的核心部件。

图片：Walter（瓦尔特）AG

发电机必须尽可能高效地将汽轮机的旋转能转换为电能。为此，其核心部件——电轴——必须经过极其精密的加工。这确实是一项巨大挑战：因为发电机轴的长度可达15米，重量可超过200吨。其主绕组槽的切削深度可达250毫米，长度可达9米。



像Walter WF341这样的转子槽铣刀适用于直径最大1.3米、刀刃宽度超过50毫米且表面质量可达Ra 1.6的工件

图片：Walter (瓦尔特) AG

柔性刀盘系统 (例如 Walter WF341 转子槽铣刀) 可灵活使用于粗加工和精加工。采用 Wiper 修光刃可转位刀片, 可实现 Ra 1.6 及更优的表面质量。这些刀片具有特殊形状的切削刃, 在进给过程中不仅能切除材料, 还能对材料表面进行平滑处理。由此可获得极低粗糙度的表面, 并降低切削力。因此, 即使在加工大直径工件和复杂轮廓时, Wiper几何形状也能确保始终如一的高质量和加工可靠性。

通过定制化解决方案, 可满足所有型材形状的加工需求。诸如Walter WF341这样的系统不仅使用起来非常灵活, 而且具备工艺可靠性, 还能高效可靠地加工较大工件—正如所示, 在能源领域, 此类工件往往是常态而非例外。

示例: 风力发电机的机架



根据风力发电机组规模的不同, 其机架重量可达70吨, 上面安装着众多较大部件。

图片：Adobe Stock

支架是风力发电机组发电机舱的核心工件。减速机、转子轴承以及塔架连接轴承均安装在其上—此外, 它还承载着发电机。其重量可达70吨, 因此需承受极高的动态持续载荷。因此, 其制造必须符合最高的质量和安全第一的要求。通过使用高精度的孔加工和铣削工具, 可以可靠地满足这些要求。



重切削铣刀 (图中所示为Walter M3016, 具有不规则齿距、较大切屑空间, 可实现最优的排屑效果, 并采用Tiger Tec (Gold) 技术)® (金虎涂层刀片) 可确保较长刀具寿命和极高工艺可靠性—即使在湿加工中也是如此。

图片：Walter (瓦尔特) AG

重切削铣刀特别适用于对较大功能表面进行性能强劲的粗加工和面铣。典型应用包括对实心铸件表面进行预加工, 以及为齿轮箱、发电机或轴承铣削连接面和基准面。

铣刀上呈切向排列的可转位刀片, 即使在较大的切削深度下也能确保极高的稳定性, 并实现最大的切屑量。具有多达四个有效切削刃的可转位刀片提高了经济效益, 而铣刀坚固的结构则确保了极高工艺可靠性。这对于可靠且以最高精度制造工件而言, 是一个关键因素。

由高温合金制成的 汽轮机 叶片、转子和轮盘



图片：Adobe Stock

在加工镍基高温合金（如因科镍合金）、雷内合金或钛合金时，通常会使用高性能铣刀（见图）。可转位刀片呈切向布置，具有4个成90°角的切削刃，可实现较大的切深和进给量。由于切削角半径较小，几乎完全消除了轴向力和振动。



像Walter BLAXX™ F5041（图中配备Tiger-tec® Gold切削刀片）这样的高性能铣刀，在叶片加工中可实现所谓的“高性能切削”——切深可达9毫米，配合高进给，从而实现极高的生产效率。

图片：Walter（瓦尔特）AG

在铣削锻造表面或非均匀边缘区域时，采用立装可转位刀片的设计可提高加工可靠性，并降低刀具失效的风险。因此，即使在苛刻的条件下，该铣刀也能对工件进行可靠且精确的加工。



经济、加工稳定、耐磨：配备HiPIMS可转位刀片的松树形铣刀（图中为瓦尔特（Walter）非标铣刀 F2001）仅需一把刀具、一次加工，即可满足各种不同的要求。

图片：Walter（瓦尔特）AG

在汽轮机转子和轮盘的半精加工及精加工过程中，会使用专用的“圣诞树”式铣刀。与整体硬质合金刀具相比，采用可转位刀片*的刀具能显著提高加工效率。无需进行再磨削，刀具寿命可预测，装夹过程也得以简化。同时，对替换刀具的需求减少，从而降低了刀具周转率，并将每个工件的总成本降至最低。结果：在提高工艺可靠性的同时，降低了成本并缩短了加工时间。

* 目前，Walter（瓦尔特）是全球唯一一家提供配备可转位刀片的松树形精加工铣刀的制造商

风力发电机转子轮毂上的孔和螺纹



图片：Adobe Stock

对于大量连接孔（例如转子与驾驶舱之间的连接孔，直径范围通常为M24–M64），需要采用最高性能级别的可转位刀片钻头。得益于较低的切削力和高效的排屑性能，这些钻头能确保孔加工过程的工艺可靠性高。同时，采用“Wiper”几何形状的切削刀片可实现卓越的表面质量，即使面对要求苛刻的内孔轮廓也是如此。对于此规模的工件——且考虑到此处需要钻削的孔数众多——这些切削刀片堪称真正的“生命保障”。因为一旦工件报废，成本将极其高昂。

每个转子必须为叶片螺栓加工300至400个螺纹！在此过程中，必须确保极高工艺可靠性。可转位刀片式螺纹铣刀（图中所示：Walter T2711）可确保稳定高效的加工：内冷与精准的切屑排出相结合，可防止切屑缠绕，并最大限度地降低刀具崩刃和昂贵部件受损的风险。集成的排屑槽通过防止刀具在深螺纹和长切入深度下被挤出，进一步稳定了加工流程。其平稳的运行特性还确保了螺纹质量的可重复性—无振动、无尺寸偏差。



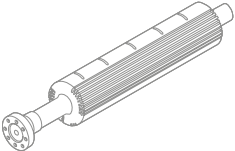
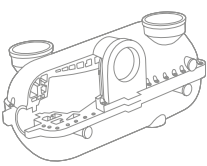
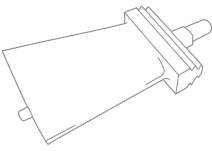
每个转子需加工300至400个螺纹，这对刀具提出了极高的要求：多排齿可转位刀片螺纹铣刀（如Walter T2711）在此类应用中不仅能确保刀具稳定导向，还能实现低振动切削，并具备卓越的加工可靠性。

图片：Walter（瓦尔特）AG



每个转子轮毂最多可加工60个连接孔。可转位刀片钻头（图中所示：一款配备Tiger-tec® Gold切削刀片的Walter D4120）凭借较低的切削力及出色的排屑性能，确保了工艺可靠性高。

图片：Walter（瓦尔特）AG

工件	问题	解法	用途
发电机轴 	绕组槽的加工对时间要求很高；传统工艺需要使用更多刀具并进行多次加工→机器运行时间长	采用Wiper 修光刃可转位刀片的柔性刀片系统（例如 Walter WF341 转子槽铣刀）	适用于粗加工和精加工，在大切深条件下仍具有高稳定性，加工可靠性高，金属去除率更大
汽轮机缸体 	大型铸钢件（例如 G20Mn5）需要长悬伸→振动、表面划痕，机床过载	专用方肩铣刀/高功率铣刀，运行振动小（+ 带Tiger-tec® Gold（金虎）涂层的可转位刀片）	平稳运行→避免了表面划痕；工艺稳定性高→可实现少人值班；降低生产成本
汽轮机叶片 	因科镍合金/钛：难以加工，强力冲击或边缘区域会导致刀具断裂	配备立装可转位刀片的 Walter BLAXX™ F5041/F5141 等高性能铣刀；配备 HiPIMS 可转位刀片的“圣诞树”式叶根型线铣刀	在遭受强烈冲击时的稳定性→磨损更小、加工更安全、更高的刀具寿命
风力发电机叶轮轮毂 	数百个螺栓孔必须精确定位；材料不均匀会导致孔加工偏离轨迹	可转位刀片钻头，如 Walter D4120；可转位刀片式螺纹铣刀，如 Walter T2711	切削力小、工艺可靠性高、排屑顺畅、表面质量优异

工艺稳定性需要受控的温度

在高速切削加工中, 产生的热量是一个核心挑战。因为切削的有效加工区域会产生较大量的热量, 这些热量既作用于刀具, 也作用于工件。特别是在加工难切削材料(如Inconel 718) 时, 传统的冷却系统往往会达到其极限。这是因为像Inconel或René合金这样的镍基高温合金具有相对较低的导热性。因此, 产生的大部分热量无法通过切屑散发出去, 而是集中在刀具与切屑之间的接触区域。

切削区的高温会导致切削刃承受的热负荷显著增加。如果冷却方式未能针对性地实施, 或者冷却效果不足, 将显著加速切削刃的磨损, 例如导致切削刃发生塑性变形、扩散磨损或沟槽磨损。结果就是必须提前更换刀具。

这就是高压冷却系统发挥作用的地方

高压冷却系统(英文“High Pressure Cooling”, 简称: HPC) 将冷却润滑液以高压方式精准输送至刀具与切屑的接触区。此外, 高压射流能够改变切屑流向, 实现切屑断裂形态的可控化。因此, 热量得以更有效地散发, 切屑成型性能得到优化, 接触区域的摩擦和温度也随之降低。最终实现了热稳定性更强的切削加工过程。

通常, HPC 技术不仅能实现高切削速度, 还能显著延长刀具寿命。额外好处是: 更优的温度控制有助于减少工件因热应变导致的边缘区域损伤, 从而确保零部件的质量。



第三章： 总结与展望

现代刀具解决方案是能源转型最重要的推动力之一。因为无刀具解决方案，针对以往要求严苛的环境制造复杂零部件，既无法进行规划，也无法确保可靠性，更无法实现盈利。

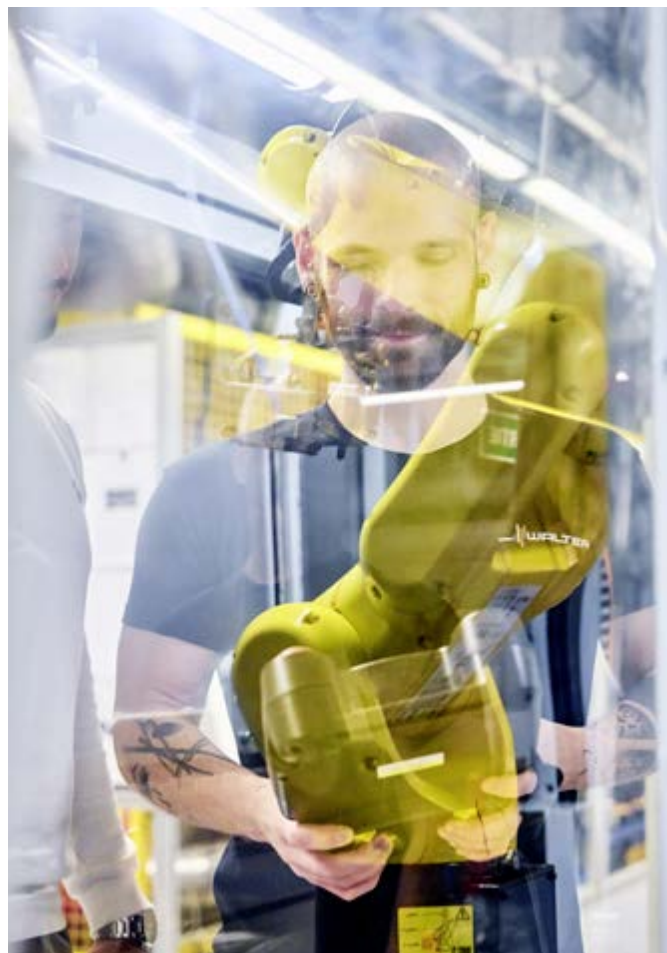
图片：Adobe Stock

总而言之，能源领域项目的成功不仅取决于周密的规划，工业规模的实施同样至关重要。

首先，这涉及组件本身的要求：它们的结构有多复杂，相应地制造起来又有多复杂？采用什么材料？它们必须承受哪些力以及满足哪些环境条件（如温度、风和天气、辐射、材料等）？一旦这些要求明确，便开始寻求解决方案：制造工艺应如何设计？哪些工装工具适合用于此？什么方案是理想的，什么方案又具有经济性？而这仅仅是个开始！当理论与实践相结合时，才真正令人兴奋。

一切都要协调：工件与刀具、机床与员工

尽管复杂的大型零部件在搬运方面显然存在困难（哪台机床能容纳重达300吨的轴？），但其制造仍必须满足对尺寸精度和表面质量的最高要求。在此类情况下，哪怕是较小的偏差，都可能导致巨额成本、工期延误、性能受损，甚至引发更严重的后果。只有当所有环节都精准契合时，才能将装夹换刀、停机和废品率降至最低。



未来，要实现有能力进行专业的工程设计，以下要素依然不可或缺：具备跨领域专业知识、创新思维和扎实专业技能的专家。

图片：Walter（瓦尔特）AG

规划、零部件、材料、机床——当然还有员工……只有当所有要素紧密结合时，才能确保生产过程的稳定性和可重复性，并使复杂工件的生产既可规划又高效。

这种整体化方法的优势显而易见：可重复的尺寸精度和精密的表面质量，不仅能确保零部件达到预期使用寿命，还能降低出现故障的风险——在能源行业较为常见的大型项目中，此类故障往往会迅速导致难以估算的高额成本。与此同时，现代切削技术还能缩短生产周期，并减少废品率和返工量。

结论

在能源领域，现代刀具系统所带来的效益更多，不止于众所周知的“每切削刀成本节约”。它们通过稳定工艺流程并最大限度地减少停机时间，成为影响整个项目全生命周期成本（TCO）的战略杠杆。与此同时，它们还能提高金属去除率（MRR），从而确保生产流程更加高效。

精准的尺寸稳定性、工艺稳定性高与高效的材料去除相结合，为制造企业带来了可量化的竞争优势——这一点在制造高度复杂的能源部件时尤为显著。

现在是煤炭、天然气和核能——明天或许是氢能、风能和太阳能：能源部件的生产线必须灵活应对不断变化的需求，例如日益增加的几何复杂性，以及市场经济、政治需求或气候条件等因素。因此，数字化、自动化和智能过程监控在未来竞争产品中仍将发挥决定性作用。

只有那些坚持不懈地通过将工具、机床和工艺流程紧密结合，从而始终如一地贯彻系统思维的企业，才能真正为生产制造奠定面向未来的基石。因为只有这样，未来才可能在能源领域经济高效地实施项目、可靠地制造工件，并长期保障能源设备的性能。

保密标注：

本白皮书包含Walter AG公司（地址：Derendinger Str. 53, 72072 Tübingen）的授权信息及内部信息。严禁以任何形式（包括全部、部分或复制）传播本白皮书的内容、所含图纸及数据。如有例外情况，须获得Walter AG Tübingen公司的明确书面许可。

